

IAHR

AIHH

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

EVALUACIÓN DE DEPOSICIONES MEDIANTE MODELO HIDRO- SEDIMENTOLÓGICO EN GRAN TRAMO DEL RÍO PARANÁ INFERIOR

Marina L. Garcia⁽¹⁾, Pedro A. Basile⁽¹⁾ y Gerardo A. Riccardi^{(1)y(2)}

(1) Dto. Hidráulica (EIC) y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, (2) Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario – Fac. Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario, Argentina. mgarcia@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN:

En este trabajo se presenta la aplicación de un modelo hidro-sedimentológico en el río Paraná Inferior, tramo de Diamante a Ramallo, cubriendo un área de 8100 km², comprendiendo el cauce principal y la planicie de inundación. Se realiza una evaluación comparativa de las deposiciones que tienen lugar durante un período de caudales mayoritariamente encauzados, Sept.2010-Ago.2015, frente al año subsiguiente Sept.2015-Ago.2016, que presenta una crecida moderada, con flujo de desborde desde el cauce hacia el valle. Los hidrogramas de entrada al dominio se realizaron a partir de registros en estaciones aguas arriba, y para los sólidos ingresantes se generaron sedimentogramas desde las principales fuentes de aporte de la carga de lavado, que se propagó hasta el contorno aguas arriba del tramo modelado. Para la cuantificación de procesos de deposición, se aplicó el modelo hidro-sedimentológico CTSS8-FLUSED. Los resultados de la modelación hidrodinámica son satisfactorios, lográndose una buena reproducción de caudales y niveles hidrométricos en los puntos de control. Los resultados sedimentológicos indican que las deposiciones en la planicie para el año de la crecida 2015-2016, donde coinciden los mayores caudales líquidos y sólidos, siendo presente el flujo de desborde, llegan a ser de más de tres veces ($12,4$ a $14,4 \times 10^6$ t/año) las que se generan en el período de caudales medios encauzados y similar aporte sólido ($3,4$ a $4,4 \times 10^6$ t/año).

ABSTRACT:

This paper presents the application of a hydro-sedimentological model in the lower Paraná river, from Diamante to Ramallo, covering an area of 8100 km², including the main channel and floodplain. A comparative evaluation is made of the sediment depositions that take place during a period of mostly channeled flows, September 2010-August 2015, compared to the subsequent year September 2015-August 2016, which presents a moderate flood, with overflow from the channel to the floodplain. The input hydrographs to the model domain were developed from records available in upstream stations, and the incoming sedigraphs were generated from the main sources of contribution of the wash load, which were propagated up to the upstream boundary of the model. For the quantification of sediment deposition processes, the hydro-sedimentological model CTSS8-FLUSED was applied. The results of the hydrodynamic modeling are satisfactory, achieving good reproduction of discharges and water levels at the control points. The sedimentological results indicate that floodplain depositions, for the year 2015-2016, become more than three times ($12,4$ to $14,4 \times 10^6$ t/year) those generated in the period 2010-2015 of average channeled discharges and similar suspended sediment inputs ($3,4$ to $4,4 \times 10^6$ t/year).

PALABRAS CLAVES: río Paraná; modelación hidro-sedimentológica; deposiciones sistema cauce-planicie

INTRODUCCIÓN

La importancia del río Paraná dentro de nuestro país, desde diversos aspectos, hace que su estudio sea fundamental para contribuir al conocimiento de los procesos que en éste se suceden. En particular, la hidrodinámica que tiene lugar en él es debido a la formación geológica que ha tenido y a las geoformas allí presentes, donde en su conformación actual cauce-planicie son considerables los procesos de deposición de la carga de lavado. Los ecosistemas presentes en estos grandes ríos de llanura, tienen anegamientos periódicos durante las crecidas, las cuales son cruciales para mantener la biodiversidad e integridad ecológica de estas áreas. Además, éstas producen la atenuación de las crecidas al conducir flujo de desborde desde el cauce principal. Las partículas sólidas que ingresan con éste al sistema, son las principales determinantes de las deposiciones en la planicie de inundación.

La complejidad que presenta el sistema de humedales del Paraná Inferior, hace que el río sea altamente valorado, el cual posee características singulares: una red hidrográfica interna de múltiples cauces, con diferentes órdenes de tamaño, conectividad y actividad hidrosedimentológica (Iriando, 1972; Drago, 2007; Ramonell et al., 2011, citados en Alberdi y Ramonell, 2013). La distribución interna de la carga sólida que llega a la planicie de inundación, es un tema poco explorado, y de difícil determinación; incluso la evaluación de las diferentes maneras de ingreso, ya que el agua presente en la misma puede ser proveniente de flujo encauzado (a través de los cursos internos o por ingreso en las depresiones de los albardones costeros del cauce principal) o por desborde sobre dichos albardones al presentarse crecidas con volúmenes significativos.

La modelación matemática permite cuantificar fenómenos hidrodinámicos y sedimentológicos, evaluando el comportamiento integral del sistema. Éstas son herramientas muy valiosas, que tienen distintas simplificaciones, de acuerdo al grado de representación del fenómeno y del área involucrada. La implementación de los modelos cuasi-2D es una de las mejores opciones para las simulaciones en estos ambientes. Éstos logran un buen compromiso entre el bajo costo computacional y la adecuada representación de los procesos físicos involucrados, donde la dinámica hídrica es a gran escala espacial y de largo plazo. Sobre el área de estudio se han implementado y aplicado el modelo cuasi-2D CTSS8 (Riccardi, 2001) y módulo FLUSED (Basile et al., 2007), físicamente basados y espacialmente distribuidos, que simulan numéricamente los procesos de inundación en el sistema cauce-planicie, y el transporte y deposición de sedimentos finos, respectivamente. Las aplicaciones anteriores del modelo en la zona de estudio (García, 2013; García et al., 2012; 2013a y b; 2015; 2017), tuvieron resultados muy satisfactorios. El modelo también fue aplicado exitosamente en otro tramo del río Paraná (Werter et al., 2018), específicamente en el Delta del mismo, cubriendo un área de 2500 km². En este trabajo se presenta la aplicación del modelo hidro-sedimentológico cuasi-2D indicado anteriormente, sobre un gran tramo del Paraná Inferior, para la evaluación global de las deposiciones en el sistema, vislumbrando sobre las diferencias frente a una situación de flujo mayoritariamente encauzado y otra donde se presenta importante ingreso sólido a través de flujo de desborde.

OBJETIVOS

El objetivo del trabajo es la evaluación, mediante modelación hidro-sedimentológica, del comportamiento del sistema cauce-planicie en un tramo de 208 km del río Paraná, entre las ciudades de Diamante y Ramallo (Argentina), cuantificando las deposiciones de sedimentos y retención de sólidos que tuvieron lugar entre los años 2010 y 2016, a través del análisis integral del área de aproximadamente 8100 km² del río Paraná Inferior. En particular, se compara los resultados sedimentológicos para la crecida 2015-2016, con los del período anterior de 5 años, donde los caudales fueron inferiores.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo hidrodinámico utilizado es el CTSS8 (Riccardi, 2001), que simula el flujo de agua, basado en un esquema de celdas amorfas interconectadas, que representan

planialtimétricamente al cauce principal, cursos secundarios, relieve del valle, bajos y lagunas, albardones. La propagación cuasi-2D de caudales se realiza mediante leyes de descarga entre celdas, las cuales han sido derivadas a partir de la ecuación de Saint Venant (aproximación de onda difusiva). La distribución espacial de los parámetros del modelo y de las variables hidrodinámicas se realiza a través de la subdivisión del dominio del modelo de celdas irregulares, que se adaptan a la configuración planimétrica del área a representar.

El modelo se aplicó desde Diamante (provincia de Entre Ríos, Argentina) a Ramallo (provincia de Buenos Aires, Argentina), y comprende al cauce principal y llanura de inundación (Figura 1a). El ancho del valle aluvial varía entre 30 y 60 km, y el del canal principal varía de 0,5 a 3 km. El caudal medio anual en Rosario (km 416 de la vía navegable) es 17000 m³/s. La relación entre caudales líquidos máximos y mínimos es de 9, valor bajo, característico de los grandes ríos. La llanura de inundación es morfológicamente compleja, donde se presenta una red de canales bien desarrollados, de distintas jerarquías, espejos de agua en espiras de meandros, lagunas, bajos permanentes y temporarios, y se presentan diferentes tipos de vegetación. En el tramo en estudio, el agua que ingresa a la planicie, lo hace a través de cursos de agua menores originarios en el cruce del cauce principal, presentándose dos principales escurrimientos: encauzado sobre la margen derecha (cauce principal) y sobre el valle aluvial (a través de cursos, bajos y lagunas interconectados).

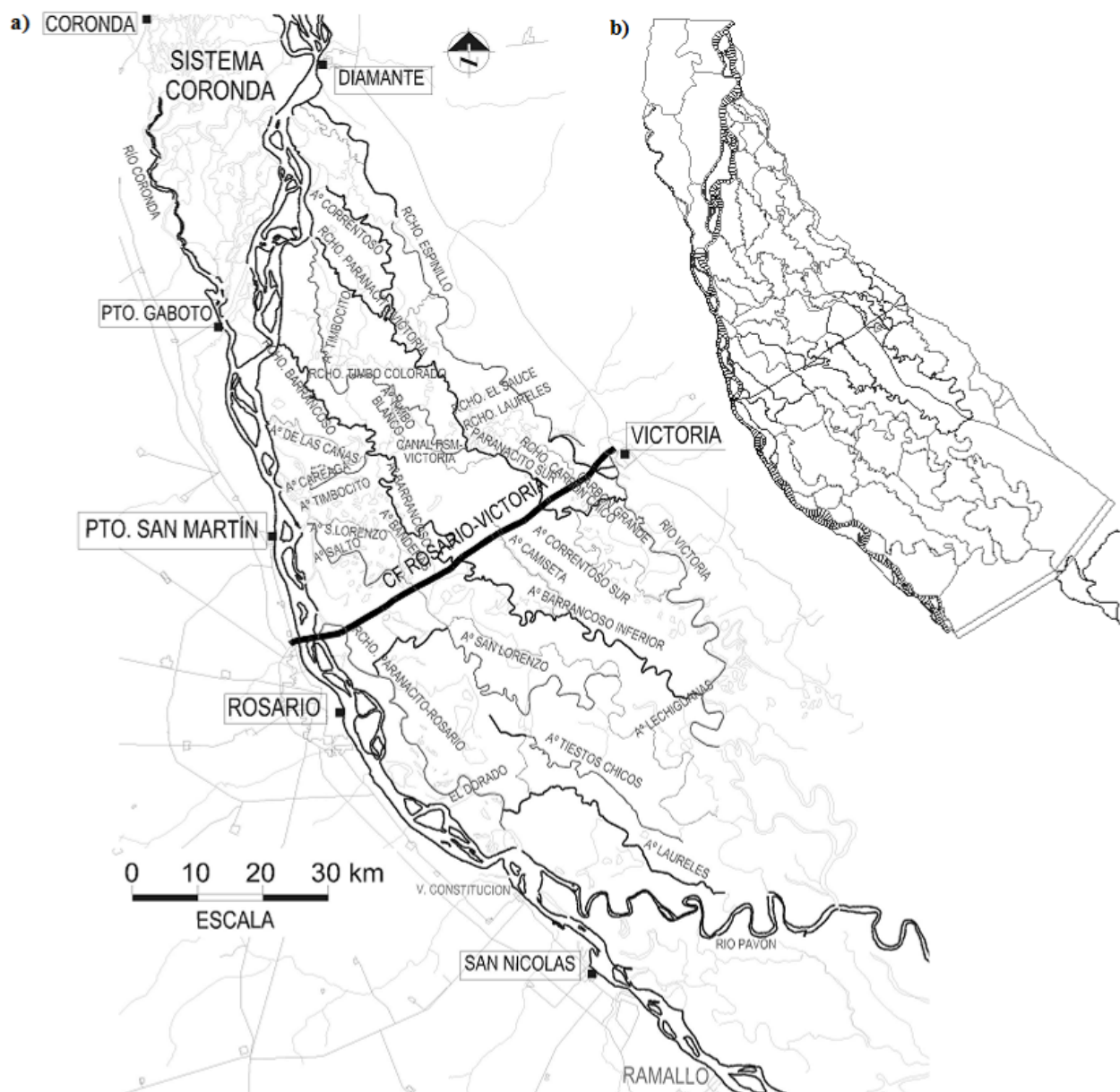


Figura 1.- a) Área en estudio, b) Visualización de la constitución del modelo matemático

El régimen del Paraná es principalmente gobernado por los aportes provenientes de aguas arriba, los afluentes laterales incrementan en poco porcentaje el caudal total. La principal entrada de volumen de agua y sedimentos a en la zona en estudio, es a través del cauce principal del río, en Diamante. El otro aporte significativo viene dado por el río Coronda, conformado aguas arriba del dominio por un sistema de depresiones lagunares, que culminan en un flujo encauzado.

La fuente dominante del material fino que predomina en el río Paraná Inferior es la cuenca alta del río Bermejo. El transporte de sedimentos promedio que ingresa al sistema es de 150×10^6 t/año, de los cuales el 83 % son limos y arcillas transportadas en suspensión como carga de lavado (Amsler y Drago, 1999).

La discretización topológica se realizó mediante la definición de celdas Río, celdas Valle y distintas vinculaciones entre ellas, donde se representan características topográficas especiales (albardones naturales, terraplenes de caminos, puentes, etc.). El modelo constituido (el cual incluye la conexión física -CF- Rosario-Victoria) tiene 1443 celdas Río y 152 celdas Valle, con 4366 vinculaciones entre ellas (Figura 1b). El mismo fue calibrado para aguas bajas, medias y altas, con eventos hidrológicos registrados, y posteriormente validado para tres décadas (García et al., 2012).

A partir de los resultados hidrodinámicos (alturas y caudales) del modelo CTSS8, se aplica el módulo sedimentológico cuasi-2D FLUSED (Basile et al., 2007), físicamente basado y espacialmente distribuido, que simula los procesos de transporte y deposición del material fino de la carga de lavado, para obtener tasas de deposición sobre las planicies. Las simulaciones se realizan mediante la resolución de la ecuación de continuidad sólida cuasi-2D de sedimentos suspendidos. El flujo vertical de sedimentos, asociado a la deposición, es proporcional a la probabilidad de deposición P_d , a la velocidad de caída de las partículas w_s y a la concentración de sedimentos suspendidos C_s . La P_d viene dada por el criterio de Krone (1962), en función de la velocidad media de flujo U y de la crítica para el comienzo de la deposición U_{cd} . Los parámetros sedimentológicos ($U_{cd} = 0,15$ m/s, la w_s se trabaja con el rango: 1×10^{-5} - 1×10^{-4} - 4×10^{-4} m/s, porosidad: 0,42) fueron definidos en base a un análisis de sensibilidad de los mismos, y desde rangos plausibles obtenidos de mediciones (García, 2013). Se calculan en cada celda las deposiciones medias y totales acumuladas, así como también los incrementos en las cotas de fondo de las celdas.

Las condiciones iniciales utilizadas son alturas de agua en las celdas, obtenidas de corridas preliminares. Las condiciones de borde aguas arriba son hidrogramas de entrada, obtenidos a partir de los registros de caudales en el tramo inmediato aguas arriba, en el Paraná Medio (García et al., 2017). Se consideran diferenciadamente los ingresos a través del cauce principal, sobre Diamante (Entre Ríos) y a través del sistema lagunar Coronda (Santa Fe). La forma de computar los caudales en ambos ingresos es la siguiente: cuando la suma de los registros sobre una transecta Santa Fe-Paraná (suma de caudales en las estaciones de Túnel Subfluvial, más Colastiné, más Setúbal) es hasta los 22000 m³/s: por el cauce principal ingresa la suma de los registros de (Túnel S. + Colastiné + 4/5 Setúbal), y por Coronda ingresa la suma de lo que se registra en la estación sobre el río Salado + 1/5 Setúbal; y conforme los caudales de la suma en la transecta van aumentando, se varía proporcionalmente hasta la distribución siguiente: por el cauce principal sólo ingresa lo registrado en la estación del Túnel Subfluvial, y por el sistema Coronda: (Colastiné + Setúbal + Salado). En la Figura 2 se presentan los hidrogramas obtenidos para ambos ingresos, en el período de estudio. En el contorno aguas abajo se imponen leyes altura-caudal en las celdas de salida.

En el período 2010-2015 no hubo crecidas importantes, los máximos caudales registrados en el cauce principal (Puerto San Martín, PSM, km 448 de la vía navegable) fueron menores a 25000 m³/s, lo cual no produce desbordes significativos sobre los albardones hacia el valle de inundación. A su vez, en todo el período los caudales superaron los 13000 m³/s, lo cual indica que estos cinco años fueron de caudales medios. Por lo tanto, el ingreso de flujo al valle fue principalmente por los cursos secundarios, flujo encauzado, alimentando a las depresiones interiores de la planicie, y en menor medida se presentó flujo por desborde, o hubo ausencia del mismo. Esto se traduce en un volumen de agua en el valle de escaso a moderado. Para la crecida sucedida entre 2015 y 2016, el caudal máximo registrado fue de 26431 m³/s (estadísticamente en caudales máximos registrados,

este valor es inferior a 7 años de recurrencia), superando someramente el valor de 25000 m³/s, donde se considera que se presenta el flujo por desborde sobre la planicie, pero se produce por un período continuo de 2 meses aproximadamente, y luego de un intervalo de algo más de un mes, se vuelve a superar dicho valor, por aproximadamente un mes más. En la escala limnimétrica de Rosario (km 416 de la vía navegable) se registraron 58 días por encima del nivel de alerta y 60 días por encima del nivel de evacuación. Por lo cual, durante este año, hubo flujo por desborde por un período total de aproximadamente de 3 meses, dando mayor presencia y volumen de agua en el valle, que favorece las condiciones para generar mayor deposición de los sólidos finos contenidos en el flujo.

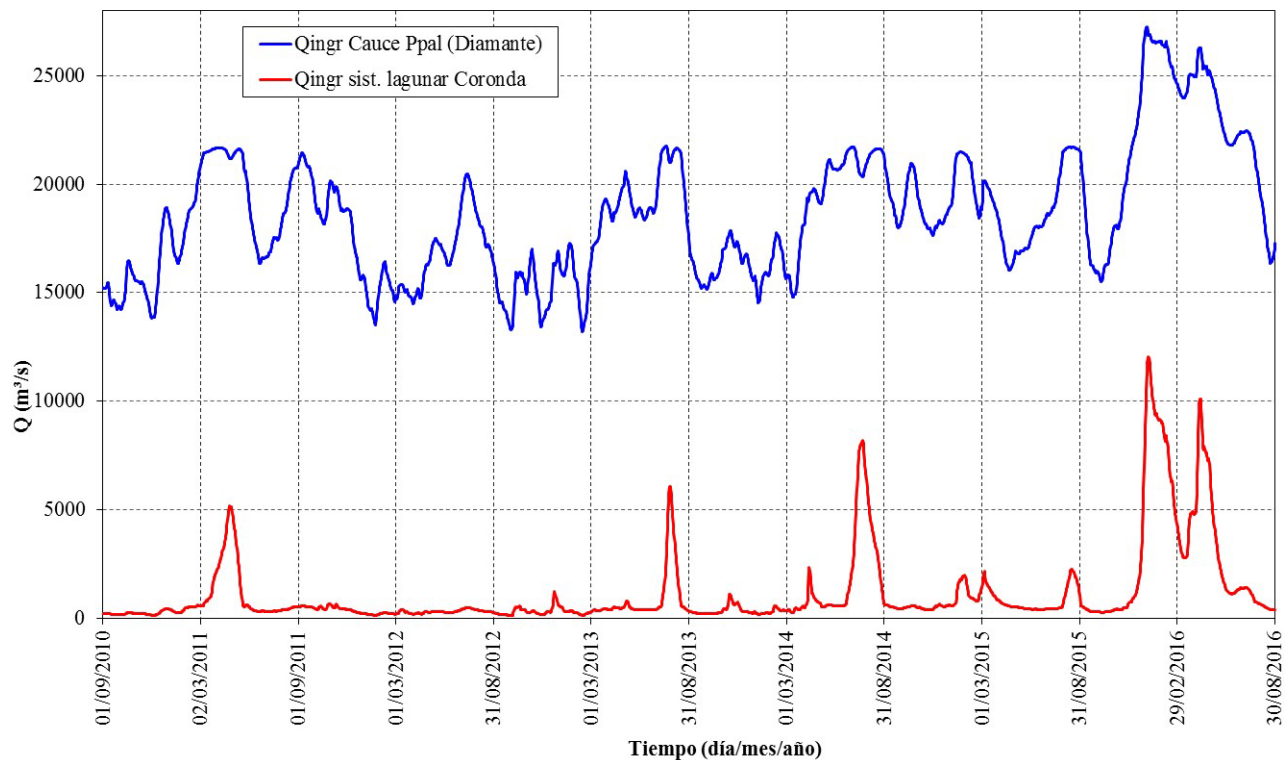


Figura 2.- Hidrogramas de ingreso de caudales en el cauce principal (Diamante) y en sistema Coronda

Las condiciones iniciales para el funcionamiento del módulo sedimentológico son los niveles de agua y caudales (de las simulaciones hidrodinámicas), las concentraciones iniciales de sedimentos suspendidos en cada celda, y la condición de borde en el extremo aguas arriba es el sedimentograma entrante, que se obtiene a partir de los registros de sólidos finos de las principales fuentes de aporte, y propagado hasta el extremo del dominio modelado.

Para elaborar un concentrograma de ingreso al modelo sobre el cauce principal, se analizan los sólidos que llegan desde aguas arriba. En la zona de Confluencia, sobre el km 1240 de la vía navegable del río Paraná, descarga sus aguas el río Paraguay, sobre el cual, 90 km aguas arriba, tiene su descarga el río Bermejo (fuente principal de los sólidos en suspensión). Se contabilizan los sólidos provenientes de las tres fuentes de aporte: del río Paraguay aguas arriba de la afluencia del Bermejo, los de éste río, y los del Alto Paraná. El aporte sólido del río Bermejo se obtiene a través de la relación entre caudales sólidos y líquidos de la estación El Colorado (Formosa, Argentina), dada originalmente por Re et al. (2009) y actualizada en Garcia et al. (2017):

$$Q_s = \begin{cases} 0,00911 Q_l^{2,430106} ; & Q_l < 200 m^3 / s \\ 0,043956 Q_l^{1,725781} ; & Q_l \geq 200 m^3 / s \end{cases} \quad [1]$$

donde Q_s son los caudales sólidos (kg/s) y Q_l son los caudales líquidos (m³/s), para dicha estación de registro. Los caudales líquidos considerados del río Bermejo tuvieron en cuenta un

desfasaje temporal de 10 días (traslado aproximado hasta el borde aguas arriba del modelo en Diamante). Los aportes desde el Alto Paraná y desde el río Paraguay fueron estimados a partir de los registros de aforos sólidos publicados por la SSRH en ambos cursos de agua, en Garcia et al. (2017) se efectúa una valoración ajustada de cada carga sólida anual (Gw). Para cada aporte se consideraron valores genéricos globales ($4,01 \times 10^6$ t/año desde el Alto Paraná, y $2,06 \times 10^6$ t/año desde el río Paraguay) que se distribuyeron uniformemente en el año.

Así, se sumaron temporalmente los tres aportes de sólidos finos (desde el río Bermejo, el río Paraguay y el Alto Paraná). Se utilizan los caudales medios diarios informados por la SSRH para la estación de Corrientes (que es una sección donde pasa todo el flujo de agua que llega a la confluencia aguas arriba), y con la carga sólida calculada, se determinan las concentraciones Cw al inicio del Paraná Medio. Sobre esta carga sólida generada en la zona de confluencia, se considera una pérdida del 17 % por el atrape de sólidos que se produciría en la planicie del Paraná Medio. Así, se calculan los caudales sólidos que llegan al borde aguas arriba del modelo en Diamante, y a través de los caudales líquidos ingresantes considerados, se elabora el concentrograma de la carga de lavado. Éste se contrasta con las concentraciones de sólidos finos que surgen de los registros de la sección del Túnel Subfluvial (sección de registro más cercana aguas arriba del dominio), y se ajustan los valores mínimos del sedimentograma a valores plausibles. En Garcia et al. (2017) se evidencia el logro de una buena concordancia entre los valores desde los aforos y los obtenidos de la metodología de generación del concentrograma, donde se reproducen bien las características generales de la variación de Cw: forma, tiempo al pico, concentración promedio, rama de ascenso/descenso y magnitud total anual del aporte sólido.

Para el período Septiembre 2010-Agosto 2015, el concentrograma resultante sobre el cauce principal tiene un promedio diario de 133,9 mg/l, el máximo es de 729,2 mg/l y el mínimo de 57,5 mg/l; la carga sólida promedio diaria es de 2378 kg/s. La carga sólida media es de 75×10^6 t/año. En distintos trabajos se encuentran valores de transporte anual de cargas de lavado de 67 a 145×10^6 t/año para este tramo (Alarcón et al., 2003; Amsler et al., 2007; Sarubbi, 2007), y siendo el calculado de 75×10^6 t/año, se concluye que la carga sólida en este período es relativamente baja.

Para el período Septiembre 2015-Agosto 2016, el concentrograma resultante sobre el cauce principal tiene un promedio diario de 97,1 mg/l, el máximo es de 357,8 mg/l y se conserva el mínimo anterior; la carga sólida promedio diaria es de 2250 kg/s. La carga sólida media es de 71×10^6 t/año, con lo cual para esta crecida también la carga sólida es relativamente baja, incluso algo menor que el promedio del período anterior.

Para la entrada de sedimentos en el sistema Coronda, al no contar con aforos sistemáticos específicos en el lugar o cercanías, y al ser escasas las mediciones, se elaboró un concentrograma a partir del generado para Diamante. Se considera la misma forma y valor mínimo, se tiene en cuenta registros máximos para dicha zona (Amsler et al., 2007), y se confecciona el concentrograma proporcional al elaborado en Diamante. Para el período Sept. 2010-Ago. 2015, la concentración promedio resulta de 73,1 mg/l, y el transporte de sedimentos medio anual es de $1,7 \times 10^6$ t/año. En Amsler et al. (2007) se estipula que el Gw se encuentra dentro del rango de 4,7 a $8,6 \times 10^6$ t/año, el valor obtenido indicaría muy bajos aportes sólidos al sistema en dicho período. Para el período Septiembre 2015-Agosto 2016, la concentración promedio resulta de 65,6 mg/l, que combinados con los caudales de la crecida, resulta en un transporte de sedimentos medio anual de $6,95 \times 10^6$ t, por lo que esta crecida tendría significativos aportes sólidos desde el sistema lagunar Coronda.

Los concentrogramas de la Figura 3 son los ingresos sólidos al sistema, al cauce principal y al sistema lagunar Coronda, para realizar las simulaciones sedimentológicas.

Con las condiciones indicadas, se realiza la aplicación del modelo CTSS8-FLUSED para dos períodos: Septiembre 2010 – Agosto 2015 y Septiembre 2015 – Agosto 2016. Se trata separadamente esta última crecida importante del río para poder realizar comparaciones de resultados deposicionales.

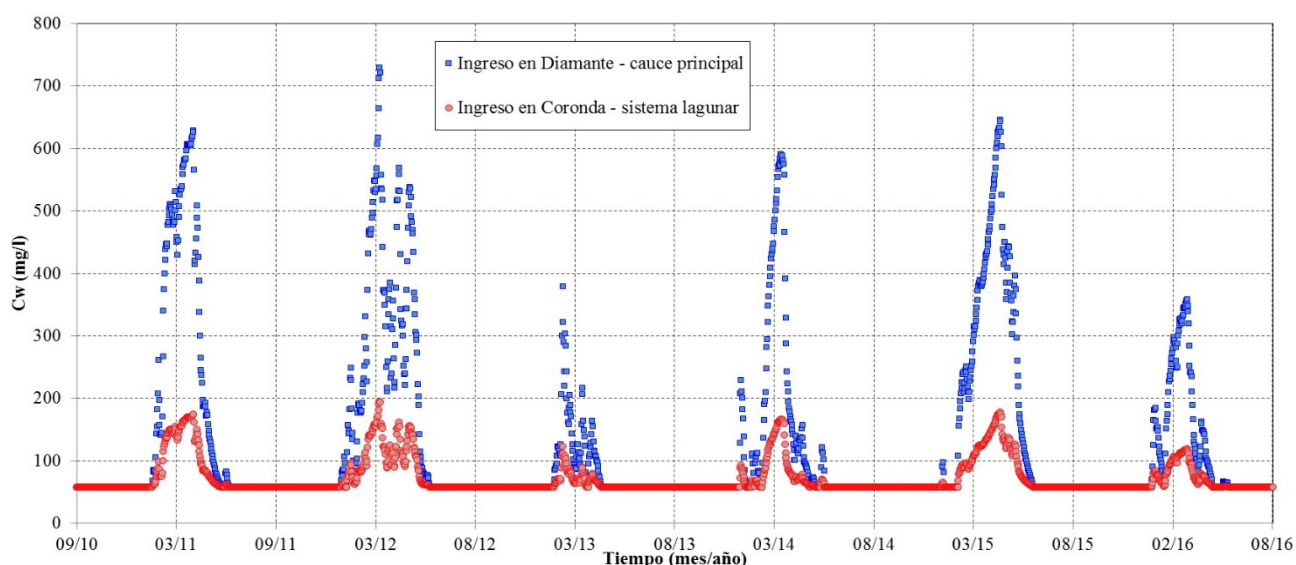


Figura 3.- Concentrogramas de ingreso sólido al modelo, del cauce principal y del sistema Coronda

RESULTADOS

En la Tabla 1 se presentan los coeficientes NS resultantes de las simulaciones hidrodinámicas, para ambos períodos evaluados. Para mostrar el buen desempeño del modelo, se comparan niveles limnimétricos, determinando el coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS), en Diamante, Victoria, Coronda, Puerto Gaboto, PSM, Rosario y San Nicolás, y de caudales en PSM. En ambos períodos los resultados de caudales en PSM dan muy buen ajuste, valores superiores a 0,89. En cuanto a las alturas de agua, los ajustes alcanzados son satisfactorios, las estaciones de Diamante, Victoria, Coronda y Puerto Gaboto tienen un desempeño aceptable, con NS superiores a 0,55, y en PSM, Rosario y SN los ajustes son muy buenos con coeficientes superiores a 0,75. Los coeficientes NS logrados reflejan la alta correlación entre las observaciones y las modelaciones. Los errores porcentuales promedio entre limnigramas calculados y observados son menores del 6,3 %, y entre el hidrograma en PSM calculado y observado es del 3,92 %. En la Figura 4 se presentan las comparaciones entre limnigramas calculados y observados, de las estaciones presentes en el dominio del modelo.

Tabla 1.- Coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS), para los resultados de las simulaciones hidrodinámicas

Estación hidrométrica	Período Sept. 2010 – Ago.2015	Período Sept. 2015 – Ago.2016
Diamante	0,59	0,63
Puerto San Martín (PSM)	0,92	0,93
Rosario	0,90	0,76
San Nicolás (SN)	0,86	0,81
Victoria	0,56	0,80
Coronda	0,56	0,63
Puerto Gaboto	0,75	0,97
QPSM	0,89	0,94

Los resultados de las simulaciones sedimentológicas se presentan en la Tabla 2 (se informan rangos de valores, donde se considera el rango de w_s factibles). Para el período Septiembre 2010-Agosto 2015, los sólidos anuales promedio depositados van desde 10 a 16×10^6 t, representando del 13 al 21 % de los sólidos ingresantes que se depositan sobre todo el dominio (acordes a porcentajes usuales en estos sistemas cauce-planicie de grandes ríos de llanura, Garcia, 2013). En el valle se depositó de $3,4$ a $4,4 \times 10^6$ t anuales, lo que representa entre el 21 % a 43 % de los sedimentos que retiene el tramo, evidenciando su rol preponderante de almacenador, que generan incrementos en las cotas de fondo que varían de 0,32 a 0,41 mm/año. Sobre el cauce principal no se contabilizan

deposiciones. En la Figura 5a se presenta la distribución espacial de las deposiciones, producto de flujo mayoritariamente encauzado sobre el valle de inundación. Los mayores depósitos se observan en las celdas de las principales lagunas (Grande y Coronda), donde las velocidades disminuyen considerablemente, y donde se ensancha la planicie.

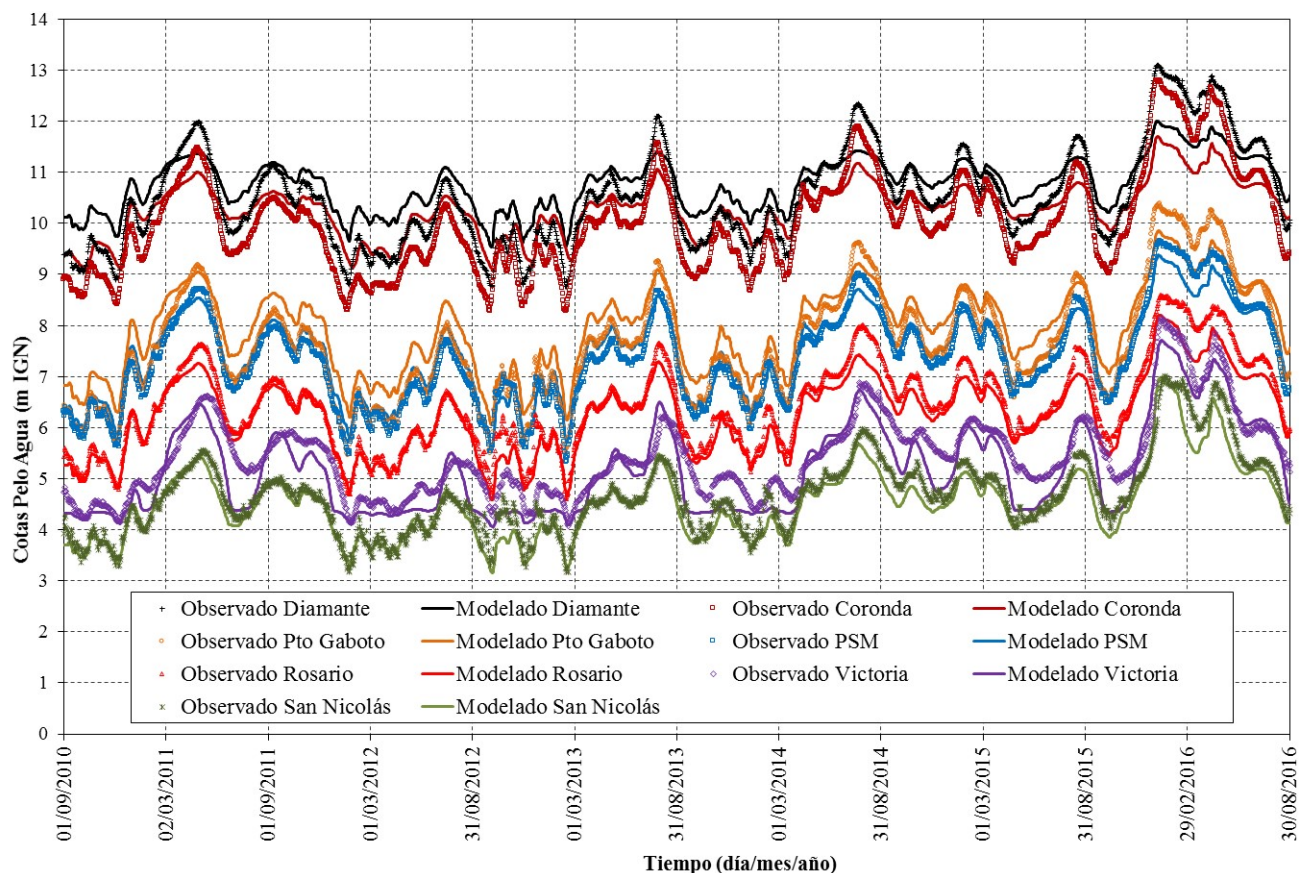


Figura 4.- Comparación de limnigramas calculados (modelados) y observados en los puntos de control, para el período Septiembre 2010 – Agosto 2016

Tabla 2.- Resultados de las simulaciones sedimentológicas

Resultados	Sept. 2010– Ago. 2015	Promedio anual Sept. 2010-Ago. 2015	Sept. 2015– Ago. 2016
Sólidos suspendidos ingresantes [$\times 10^6$ t]	383,7	76,7	78,1
Depósitos anuales en el dominio [$\times 10^6$ t]	51,0 – 80,4	10,2 – 16,1	18,7 – 32,2
Retención sólidos en dominio [%]	13,3 – 20,9		24,0 – 41,2
Depósitos anuales en la Planicie [$\times 10^6$ t]	17,1 – 21,9	3,4 – 4,4	12,4 – 14,4
Retención sólidos en Planicie [%]	4,5 – 5,7		15,8 – 18,4
Aumento cotas de fondo en Planicie [mm]	1,6 – 2,0	0,32 – 0,41	1,15 – 1,34

Para la crecida sucedida entre Septiembre de 2015 y Agosto de 2016, el caudal máximo registrado fue de 26431 m³/s, superando someramente el valor de 25000 m³/s, donde se considera que se presenta el flujo por desborde sobre la planicie. En dicho período, el ingreso sólido estimado es de $78,1 \times 10^6$ t, siendo un valor habitual a bajo de los ingresos de sedimentos en el sistema. Luego de las simulaciones hidro-sedimentológicas para esta crecida, se contabilizan deposiciones que van desde 19 a 32×10^6 t en todo el dominio (del 24 % al 41 % de los sólidos ingresantes), y dentro de la planicie de inundación de $12,4$ a $14,4 \times 10^6$ t (entre 38 % a 72 % de lo depositado en el sistema). El incremento promedio en las cotas de fondo de la planicie que generó este año con crecida significativa es de 1,1 a 1,3 mm/año, un incremento del orden de 3,5 veces lo que produjeron los 5 años anteriores en promedio. En cuanto a la distribución espacial de sólidos, se puede visualizar las deposiciones para este período en la Figura 5b. En la misma se evidencia mayor presencia de los

sedimentos en la planicie de inundación, donde si bien en las áreas más deprimidas se presentan las mayores deposiciones, no resultan tan concentradas en estas zonas, sino más distribuidas. Esto es concordante con el flujo de desborde que provoca el ingreso del sedimento en el valle de inundación.

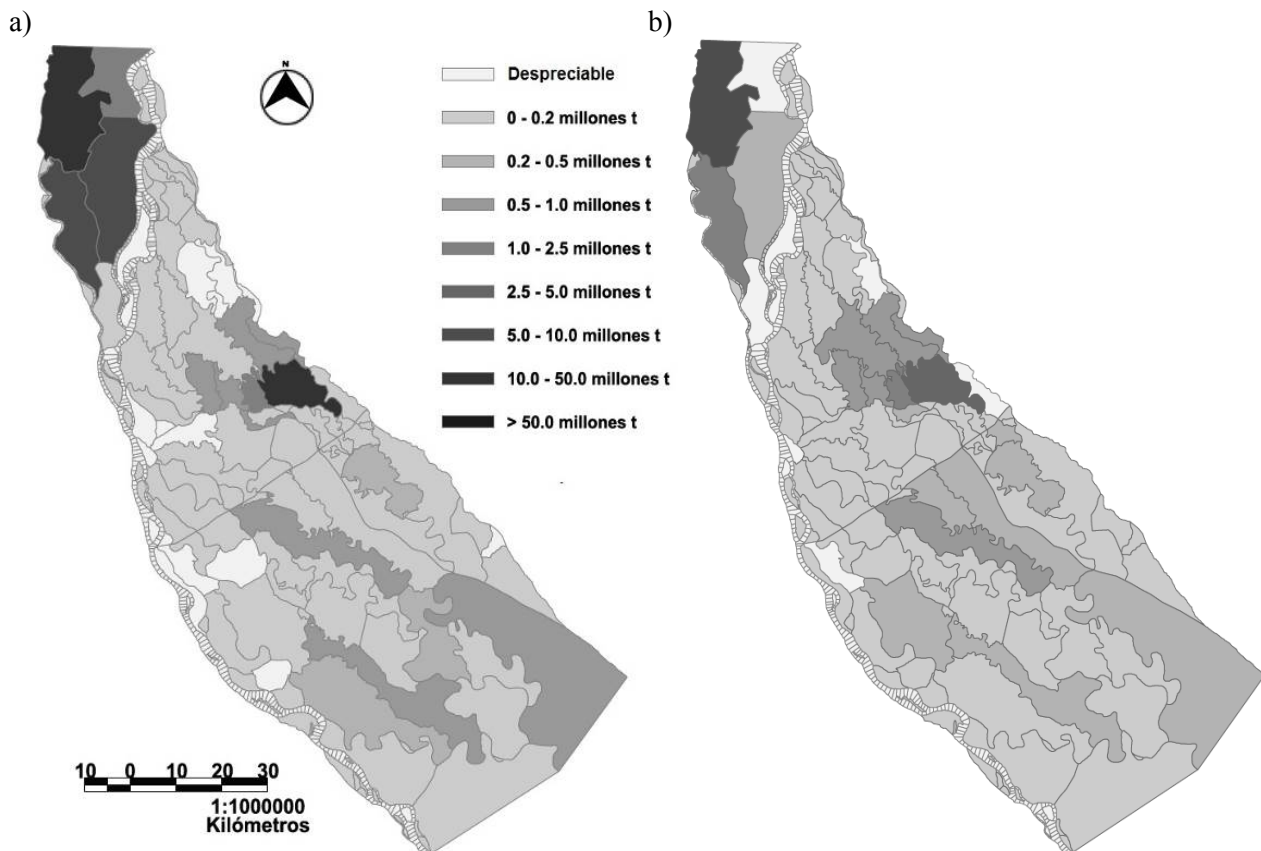


Figura 5.- Distribución espacial de deposiciones en las celdas del dominio, para $w_s = 0.0001$ m/s: a) período Septiembre 2010 – Agosto 2015; b) período Septiembre 2015 – Agosto 2016

CONCLUSIONES

A partir del modelo matemático constituido sobre el Paraná Inferior, se evaluó el comportamiento hidro-sedimentológico del sistema cauce-planicie para el período Septiembre de 2010 a Agosto de 2016. Los resultados hidrodinámicos indican un desempeño bueno del modelo, con coeficientes NS elevados para las estaciones de registro sobre el cauce principal, y aceptables para el resto.

De los resultados de las simulaciones sedimentológicas, se concluye que para el período Septiembre 2010 – Agosto 2015 de caudales medios, con escaso ingreso de sólidos al sistema, y presencia moderada a baja de agua en el valle, le corresponden deposiciones considerablemente bajas. El año subsiguiente Septiembre 2015 – Agosto 2016 presenta una crecida significativa, que según los caudales registrados, fue de carácter moderada, con generación de flujo de desborde sobre los albardones costeros. Si bien en este período se presentan concentraciones de la carga de lavado que no son extremas (máximo 360 mg/l), sino dentro de los rangos habituales (de 50 o 60 mg/l hasta 500 o 600 mg/l en los picos de caudales sólidos; Bertoldi de Pomar, 1984; DH-FCEIA, 1997; Serman y asociados S. A., 1999; Sarubbi, 2007), ni la carga sólida anual es elevada (más bien baja), sí se presentan caudales que producen flujo de desborde, donde ingresa masivamente volumen de agua al valle de inundación, por un período (en suma) de tres meses, que coincide con los picos del sedimentograma.

Los resultados sedimentológicos indican que al presentarse crecidas que generen flujo de desborde, en coincidencia con los mayores aportes sólidos, pueden generar depósitos en el valle del

orden de algo más de tres veces las cantidades anuales, y el valle llegar a retener del 62 % al 72 % de los sedimentos que se acumularían en 5 años de aguas medias (con flujo predominantemente encauzado), con escaso a moderado ingreso sólido total.

REFERENCIAS

- Alarcón, J.J.; Szupiany, R.; Montagnini, M.D.; Gaudin, H.; Prendes, H.H.; y Amsler, M.** (2003). "Evaluación del transporte de sedimentos en el tramo medio del río Paraná", *I Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Ezeiza, Argentina.
- Alberdi, R. y Ramonell, C.G.** (2013). "Evaluación de cambios morfométricos recientes en cauces menores del río Paraná Medio", *VI Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Santa Fe, Argentina.
- Amsler, M.L. y Drago, E.** (1999). "A review of the suspended sediment budget at the confluence of the Paraná and Paraguay rivers", *Symposium on hydrological and geochemical processes in large scale rivers*. Manaus, Brazil.
- Amsler, M.L.; Drago, E.C. y Paira, A.R.** (2007). "Fluvial sediments: Main channel and floodplain interrelationships", Capítulo 5, en: *The Middle Paraná River: Limnology of a Subtropical Wetland*, de Iriondo, M.H.; Paggi, J.C. y Parma, M.J. (Eds.). Heidelberg, N. York. Vol. I, pp. 123-14.
- Basile, P.A.; Riccardi, G.A.; Garcia, M.L. y Stenta, H.R.** (2007). "Quasi-2D modeling of hydro-sedimentological processes in large lowland river-floodplain systems", *Workshop on Morphodynamics Processes in Large Lowland Rivers*. Santa Fe, Argentina.
- Bertoldi de Pomar, H.** (1984). "Estudios limnológicos en una sección transversal del tramo medio del río Paraná. III: Componentes sólidos transportados en suspensión". *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral*, Vol. 15, Fascículo 1, pp. 25-46.
- DH-FCEIA.** (1997). "Estudio y Proyecto de la Obra de Dragado de Acceso al Puerto de PASA S.A.". Informe Final Convenio PASA S.A.- Departamento de Hidráulica, FCEIyA, UNR, Rosario, Argentina.
- García, M.L.** (2013). *Modelación de Procesos Hidrodinámicos y Sedimentológicos en Planicies de Inundación de Grandes Ríos de Llanura*. Tesis Doctoral, FCEIyA, UNR, Rosario, Argentina. 424 p.
- García, M.L.; Basile, P.A. y Riccardi, G.A.** (2017). "Estudio de aforos y modelación hidro-sedimentológica del cauce y planicie aluvial del Río Paraná". *VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, Córdoba, Argentina.
- García, M.L.; Basile, P.A.; Riccardi, G.A. y Rodríguez, J.F.** (2015). "Modelling extraordinary floods and sedimentological processes in a large channel-floodplain system of the Lower Paraná River (Argentina)". *International Journal of Sediment Research*, ISSN 1001-6279, Vol. 30 (2015), pp. 150-159.
- García, M.L.; Basile, P.A. y Riccardi, G.A.** (2013a). "Modelación Hidrodinámica de Crecidas Extraordinarias en Sistema Cauce-Planicie del Río Paraná Inferior". *Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Santa Fe, Argentina. E-Book ISBN 978-987-657-900-1. 1ª Ed. FICH-UNL.
- García, M.L.; Basile, P.A. y Riccardi, G.A.** (2013b). "Modelación Sedimentológica en Sistema Cauce-Planicie del Río Paraná Inferior". *Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Santa Fe, Argentina. E-Book ISBN 978-987-657-900-1. 1ª Ed. FICH-UNL.
- García, M.L.; Basile, P.A. y Riccardi, G.A.** (2012). "Modelación hidrodinámica de sistema cauce-planicie con celdas amorfas, de tramo del río Paraná Inferior", I Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, IFRH, INA, Ezeiza, Argentina, 15 p.
- Iriondo, M.H.** (1972). "Mapa geomorfológico de la llanura aluvial del Río Paraná desde Helvecia hasta San Nicolás, República Argentina". *Revista Asociación Geológica Argentina*, tomo XXVII (2), pp. 155-160.
- Krone, R.B.** (1962). "Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes". Final Rep., Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley, EEUU.
- Re, M.; Menéndez, A.N. y Amsler, M.L.** (2009). "Metodología para la generación de series temporales de descarga sólida de los ríos Paraná de las Palmas y Paraná Guazú", *Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, Salta, Argentina.
- Riccardi, G.A.** (2001). *Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos*. Tesis Doctoral, FCEyN, UNC, Córdoba, Argentina.
- Sarubbi, A.** (2007). "Análisis del Avance del frente del Delta del Río Paraná". Tesis de grado en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires. 136 p.
- Serman y asociados S.A.** (1999). "Análisis de condiciones sedimentológicas en el entorno de la Conexión vial". Informe de Puentes del Litoral S.A., Convenio Gobierno Nacional – Provincias de Santa Fe y Entre Ríos para la obra Conexión Física Rosario-Victoria. Argentina.

SSRH. Subsecretaría de Recursos Hídricos, del Sistema Nacional de Información Hídrica. Base de Datos Hidrológica Integrada: <http://www.hidricosargentina.gov.ar/AccesoBDHI.html>.

Werter, S.J.; Grimson, R.; Minotti, P.G.; Booij, M.J. y Brugnach, M. (2018). “Hydrodynamic modelling of a tidal delta wetland using an enhanced quasi-2D model”. *Journal of Hydrology*, Vol. 559, pp. 315–326.